Québec

Note de recherche forestière n° 127

L'amélioration des arbres au Québec : un outil de performance industrielle et environnementale

André RAINVILLE, Mireille DESPONTS, Roger BEAUDOIN, Pierre PÉRINET, Marie-Josée MOTTET et Martin PERRON

F.D.C. 232(047.3)(714)
L.C. SD 399.5

Résumé

Plus de trente années de travaux en amélioration des arbres au Québec ont permis de constituer une importante collection de matériel, parmi lequel six espèces sont actuellement utilisées dans les reboisements, soit l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), l'épinette blanche (*P. glauca* [Moench] Voss), le pin gris (*Pinus Banksiana* Lamb.), et quelques espèces introduites de mélèze (*Larix spp.*), de peuplier (*Populus spp.*) et l'épinette de Norvège (*Picea abies* [L.] Karst.). Ce grand nombre d'espèces contribue à satisfaire les besoins diversifiés des industriels forestiers et à améliorer la productivité de nos plantations.

La synergie entre les organismes de recherche a permis d'évaluer ce matériel dans toutes les régions écologiques du Québec et d'obtenir, en première génération, des gains en volume marchand de 8 à 16 % comparativement aux semences issues des peuplements naturels. La grande diversité génétique des plants améliorés utilisés dans les reboisements constitue aussi une garantie d'adaptation aux écosystèmes diversifiés du Québec et aux effets probables des changements climatiques.

La plantation de matériel amélioré permettrait de diminuer la pression exercée sur les forêts naturelles, de mettre en valeur des ressources autres que la matière ligneuse et de créer des aires protégées. Au sud du Québec, elle pourrait jouer un rôle déterminant eu égard aux enjeux environnementaux (CO_2, lisiers de ferme), économiques ou sociaux. En forêt boréale, elle permettrait d'accroître de manière significative le rendement des forêts compte tenu de l'importance du territoire reboisé.

Mots clés : amélioration des arbres, génétique forestière, reboisement, environnement, biodiversité.

Abstract

*More than 30 years of tree improvement work in Québec has resulted in the establishment of a large collection of material, among which six species are currently used for reforestation: black spruce (*Picea mariana *[Mill.] B.S.P.), white spruce (*P. glauca *[Moench] Voss), jack pine (*Pinus banksiana *Lamb.), and a few introduced larch species (*Larix *spp.), poplars (*Populus *spp.) and Norway spruce (*Picea abies *[L.] Karst.). This large number of species contributes to meeting the diversified needs of the forest industry, and to improve the productivity of our plantations.*

The synergy between research organizations has made possible the evaluation of this material in every ecological region of Québec and thus obtain gains in merchantable volume of 8%–16% in the first generation, as compared to seeds from natural stands. The broad genetic diversity of improved seedlings used for reforestation is a guarantee of adaptation for Québec's diversified ecosystems and for the potential effects of climate change.

The plantation of improved material gives the opportunity to reduce the increasing pressure on natural forests, to develop non-timber resources and create protected areas. In southern Québec, it could play a determining role in the face of environmental (e.g., CO_2, pig manure), economic or social issues. In the boreal forest, it could significantly increase the overall yield of the forests, given the size of the territory planted.

Keywords : Tree improvement, forest genetics, reforestation, environment, biodiversity.

Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein
SAINTE-FOY (Québec) G1P 3W8 Canada

Téléphone : (418) 643-7994
Télécopieur : (418) 643-2165
Courriel : recherche.forestiere@mrnfp.gouv.qc.ca

Hormis le résumé, ce texte est la version intégrale du mémoire présenté par les auteurs au XII[e] Congrès forestier mondial de septembre 2003 à Québec, Canada

Les versions française et anglaise du mémoire original sont aussi disponibles en format PDF à l'adresse suivante :

Original text in english is also available in PDF form on web site :

http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/alias/cfm2003.html

Introduction

La superficie du Québec est estimée à 1 667 926 km^2 et s'étend sur plus de 18 degrés de latitude. Dans ce territoire immense, ce sont surtout les facteurs climatiques, généralement plus rigoureux du sud vers le nord, qui déterminent la composition de la végétation. On y retrouve trois zones bioclimatiques distinctes : la zone tempérée nordique, composée de peuplements feuillus et mélangés, la zone boréale, caractérisée par des peuplements de conifères sempervirens, et la zone arctique, dominée par une végétation arbustive et herbacée (ANONYME 2002a). Le territoire forestier couvre près de la moitié de la superficie de la province, et est détenu à 85 % par l'État (ANONYME 2002b). Avec des livraisons annuelles de 20 milliards de dollars et des exportations de 12 milliards $, la forêt constitue l'un des principaux secteurs industriels québécois. Elle procure un emploi direct à plus de 90 000 travailleurs (ANONYME 2002a). La possibilité de coupe annuelle dans les forêts publiques québécoises est estimée à près de 42 millions de m^3 et est constituée à 70 % de sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.), d'épinettes (*Picea spp.*), de pin gris et de mélèze laricin (*Larix laricina* [Du Roi] K. Koch).

Les plantations constituent actuellement 5 % de la superficie forestière mondiale. Elles assurent cependant une part croissante de l'approvisionnement et produisent 35 % du bois consommé dans le monde (WHITEMAN et BROWN 1999, FAO 2001). Autant en Nouvelle-Zélande (*Pinus radiata* D. Don) qu'au Chili (*Pinus spp.* et *Eucalyptus spp.*), qu'en Scandinavie (*Picea abies* et *Pinus sylvestris* L., notamment) et dans le sud des États-Unis, de vastes programmes visant l'obtention de plants améliorés de deuxième génération, voire de troisième génération ont été mis en place. Après une première génération seulement, les gains en volume résultant de l'utilisation de plants issus des programmes d'amélioration génétique varient entre 5 et 15 %, selon le pays et l'espèce, alors que des gains additionnels équivalents sont rapportés par l'ajout d'une sylviculture intensive (GROUPE DE TRAVAIL SUR L'AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE DU MFO-QUÉBEC 1996).

Au Québec, environ 150 millions de plants sont mis en terre annuellement, soit une superficie de 75 000 ha (0,14 % du territoire forestier productif), principalement en forêt boréale. Environ 52 % des plants utilisés actuellement pour le reboisement sont issus des programmes d'amélioration génétique et cette proportion devrait augmenter à 80 % en 2005 (MASSE 2002). C'est le gouvernement qui a la responsabilité de fournir les semences et les plants nécessaires au reboisement sur les terres publiques et privées. La Stratégie de protection des forêts, adoptée par le gouvernement du Québec en 1994, visait à assurer le renouvellement des forêts, à protéger les ressources qu'elles renferment, à harmoniser les multiples utilisations du milieu et à y éliminer le recours aux pesticides chimiques (en vigueur depuis 2001) (ANONYME 1994). Le but premier de cette stratégie était d'assurer la pérennité des écosystèmes et le maintien de la diversité biologique. Pour y parvenir, le gouvernement a identifié cinq grands principes directeurs, dont le respect de la dynamique naturelle des peuplements. La priorité a donc été accordée à la régénération naturelle. Considérée comme un traitement sylvicole complémentaire, la plantation représente tout de même l'un des moyens privilégiés pour accroître la productivité forestière québécoise.

Les exigences liées à l'application du principe du développement durable ont entraîné des pressions accrues sur l'utilisation du territoire forestier, que ce soit pour la mise en valeur des ressources autres que la matière ligneuse ou pour la création d'aires protégées (ANONYME 2000). Par ailleurs, la ratification du Protocole de Kyoto pourrait entraîner des impacts majeurs sur la gestion des forêts naturelles et sur les programmes de reboisement ou de boisement. Ainsi, le reboisement est identifié comme la stratégie à privilégier pour fixer le carbone atmosphérique. Les spécialistes évaluent que les plantations pourraient contribuer à fixer entre 0,8 et 2,4 t ha^{-1} an^{-1} de carbone supplémentaire (BROWN *et al.* 1996).

Les programmes d'amélioration des arbres ont été mis en place à partir de 1969. Les acquis sur le plan des connaissances et du matériel disponible placent aujourd'hui le Québec dans une position privilégiée pour relever le défi d'augmenter la production forestière et de conserver la diversité biologique. Ce défi est de taille, dans le contexte où la forêt boréale couvre plus de 40 % de la superficie forestière de la province.

Matériel et méthodes

Les premiers travaux en amélioration génétique des principales espèces forestières ont été entrepris à la fin des années 1950. Un effort plus soutenu a été consenti à partir de 1969, alors que le gouvernement décidait d'investir dans la mise en place d'un programme structuré. Au début des années 1980, on établissait un vaste réseau de vergers à graines de première génération, afin de produire des semences améliorées (LAMONTAGNE 1992). Les travaux sont réalisés par les chercheurs du ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec[1] et du Service canadien des forêts. Contrairement aux autres provinces canadiennes et à certains états américains, aucune coopérative ne regroupe les partenaires industriels et les organismes intéressés à l'amélioration génétique.

Trente ans plus tard, le Québec dispose d'une importante collection de matériel (provenances, descendances et variétés améliorées), incluant 18 espèces indigènes et 136 espèces introduites (64 espèces feuillues et 90 conifères) (ANONYME 2001). Au total, 3,8 millions de plants ont été évalués dans 1 294 dispositifs expérimentaux répartis dans l'ensemble des régions écologiques.

[1] Depuis le 29 avril 2003, le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) est désigné sous la nouvelle appellation de ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec (MRNFP).

Les efforts ont surtout porté sur l'épinette noire et le pin gris, deux composantes majeures de la forêt boréale québécoise, ainsi que sur l'épinette blanche. Avec les deux premières espèces, 81 tests de descendances, comprenant un million de plants, ont été établis dans le but d'obtenir une estimation de la valeur génétique des arbres sélectionnés en première génération. Le meilleur matériel est conservé dans 36 vergers à graines, établis sur tout le territoire forestier du Québec. Pour l'épinette blanche, des provenances de toute l'aire de distribution ainsi que des descendances couvrant tout le territoire québécois ont été évaluées dans une vingtaine de tests depuis la fin des années 1950. Dix-sept vergers à graines clonaux de première génération ont été établis dès les années 1980 et deux vergers de seconde génération en 1999. Les gains escomptés en volume marchand sont respectivement de 8 à 16 % et de 15 à 20 %. Finalement, l'intérêt accru manifesté plus récemment pour les espèces forestières à croissance rapide (peupliers et mélèzes) a accéléré la mise en place de sources de matériel amélioré (PERINET *et al.* 1998). L'évaluation en tests clonaux de plus de 4 000 clones de peupliers hybrides, obtenus principalement par croisements dirigés, a permis d'en recommander une cinquantaine pour leur rusticité et leur rendement en vue d'une production ligneuse intensive dans plusieurs régions du Québec (PERINET *et al.* 2001, RIEMENSCHNEIDER *et al.* 2001). En ce qui concerne les espèces feuillues à bois dur, le programme d'amélioration a débuté il y a un peu plus de 10 ans, mais des collections de matériel représentant plusieurs provenances ont déjà permis d'identifier des variations importantes sur le plan de la qualité des arbres.

En règle générale, les espèces introduites comprennent un grand nombre de provenances de leur aire de distribution naturelle, ce qui nous a permis d'étudier à la fois leur variabilité génétique et leur capacité d'adaptation aux conditions de croissance du Québec (BEAUDOIN 1995, 1996, 1996a, 1997). Les déplacements géographiques ont créé une pression de sélection sur ces provenances et ont fait ressortir le matériel le mieux adapté. Un certain nombre d'espèces, dont l'épinette de Norvège, le mélèze européen (*Larix decidua* Mill.), le mélèze du Japon (*Larix kaempferi* [Lamb.] Carrière), le mélèze hybride (*Larix x marschlinsii* Coaz.), le peuplier noir (*Populus nigra* L.), le peuplier baumier de l'Ouest (*Populus trichocarpa* Torr. et Gray) et le peuplier baumier du Japon (*Populus maximowiczii* A. Henry), ainsi que des hybrides de peupliers avec nos espèces indigènes, contribuent maintenant à accroître la diversité des espèces utilisées pour le reboisement au Québec et à améliorer la productivité de nos plantations. Ces espèces sont conservées principalement dans 19 arboretums et deux populetums (VALLÉE et CHOUINARD 1976). Elles constituent pour l'avenir des collections uniques d'arbres forestiers provenant du monde entier, en particulier d'Europe, du Japon et des États-Unis. Les arbres les mieux adaptés aux conditions de croissance des sites en cause sont une source importante de gènes pour la poursuite de l'amélioration génétique et la création de variétés locales plus productives, comportant d'autres caractéristiques recherchées par l'industrie. L'expérience acquise depuis plus de 20 ans avec les espèces introduites nous enseigne qu'il est important de les évaluer sur une période assez longue afin de bien connaître leur susceptibilité aux insectes et aux maladies ainsi que leurs exigences culturales.

Aujourd'hui encore, un grand nombre d'espèces (le pin gris, l'épinette blanche, l'épinette noire et l'épinette de Norvège, ainsi que deux genres principaux, soit *Larix spp.* et *Populus spp.*) font l'objet d'un programme soutenu d'amélioration génétique. Nous devons souligner la grande quantité et la diversité du matériel qui a servi de base génétique pour chaque espèce soumise à un programme d'amélioration génétique. En effet, dès le début, les généticiens forestiers ont réalisé un échantillonnage représentatif de la diversité génétique d'une espèce et ont constitué des banques de semences et de clones. Ces banques constituent une assurance en cas de disparition des peuplements d'origine et pourront éventuellement servir à réintroduire des éléments de diversité génétique en fonction des besoins (différents caractères visés par l'amélioration) et des changements observés (conditions écologiques variées par exemple) (BOUSQUET *et al.* 1994). Les études moléculaires ont aussi permis d'estimer l'impact de la domestication sur la variabilité et la structure génétique des populations. Avec l'épinette blanche, par exemple, l'analyse de sept systèmes enzymatiques indique que la sélection d'un nombre restreint d'individus n'entraîne pas de perte significative de variabilité par rapport aux populations naturelles (DESPONTS *et al.* 1993).

Résultats

L'effort soutenu consenti dans les programmes d'amélioration génétique a permis l'obtention de rendements intéressants. Par exemple, une nouvelle série d'hybrides de peupliers, davantage rustiques et à rendement élevé (8 à 12 m^3 ha^{-1} an^{-1} à 20 ans), a été développée pour la forêt mixte et la forêt boréale (domaines bioclimatiques de la sapinière) (ANONYME 2002a). Dans le Québec méridional, là où le climat est plus favorable (1 330 à 2 000 degrés-jours de croissance), les rendements obtenus peuvent atteindre 20 m^3 ha^{-1} an^{-1} sur les meilleures stations à l'âge de 15 ans. Parallèlement, les travaux effectués avec le mélèze hybride nous ont permis d'atteindre un rendement moyen de 6 à 10 m^3 ha^{-1} an^{-1} à l'âge de 35 ans.

L'épinette blanche issue de vergers de première génération et plantée sur des sites d'indice de fertilité moyen donne des gains en volume marchand de 8 à 16 % environ (14 à 28 m^3 ha^{-1}) à l'âge de 45 ans, comparativement aux semences issues de peuplements naturels. Avec les espèces les mieux adaptées à la forêt boréale nordique (pin gris et épinette noire), cependant, les rendements attendus s'avèrent plus modestes. Ainsi, avec le pin gris, les gains prévus en volume marchand sont en moyenne de 7 m^3 ha^{-1} à l'âge de 40 ans. En réalisant ensuite des croisements dirigés entre les individus des meilleures familles et en reproduisant par bouturage les semis obtenus, on peut atteindre des gains de l'ordre de 20 % en hauteur (30 à 40 % en volume marchand) pour l'épinette blanche et l'épinette noire, comparativement à la moyenne de l'ensemble des familles évaluées dans les tests, ce qui pourrait représenter un gain en volume de 72 m^3 ha^{-1} à 45 ans.

La synergie entre les organismes de recherche des gouvernements provincial et fédéral et de l'Université Laval, ainsi que la complémentarité de leurs activités constituent sans contredit une particularité importante du programme d'amélioration génétique des espèces forestières québécoises. Elle aura permis, malgré la grandeur du territoire et la diversité des écosystèmes forestiers, qu'une quantité impressionnante de matériel et plusieurs espèces soient évaluées dans toutes les régions écologiques. Cette coopération aura de plus contribué au développement d'aspects complémentaires à la recherche pratique par des études plus fondamentales et exploratoires. Ainsi, l'acquisition de connaissances sur le génome des arbres pourra aider les améliorateurs dans leur travail de sélection (sélection assistée par marqueurs). Aujourd'hui encore, malgré le retrait du gouvernement fédéral en 1996 des programmes de recherche appliquée, le gouvernement provincial, maintenant responsable de la plupart des programmes d'amélioration des arbres au Québec, entretient toujours des collaborations entre les organismes de recherche en génétique forestière. Au fil des ans, un souci constant a aussi été porté au développement de liens étroits entre la recherche et les activités de production de semences et de plants. Cette collaboration aura permis de rendre disponibles rapidement les résultats de la recherche, de façon concrète, en produisant un très grand nombre de plants améliorés destinés au reboisement. Elle aura aussi permis d'orienter plus facilement la recherche en fonction des besoins exprimés, en développant par exemple des modèles pour guider le transfert de sources de semences en fonction d'un calcul de risque ou encore les techniques de bouturage et de clonage par embryogenèse somatique.

Par ailleurs, le grand nombre d'espèces qui, encore aujourd'hui, font l'objet d'un programme d'amélioration génétique constitue un avantage en ce qu'il permet de choisir le matériel le mieux adapté à chaque site et favorise une meilleure diversification des produits de transformation pour l'industrie. D'un point de vue écologique, la résistance et la stabilité des écosystèmes face aux agents perturbateurs biotiques et abiotiques est associée à la richesse en espèces (LARSEN 1995). Il en est de même pour le grand nombre de familles et de clones inclus à la fois dans nos tests et dans les vergers de production. Bien qu'il soit généralement reconnu qu'un nombre aussi limité que 50 arbres permette de contrôler à long terme les effets de la consanguinité et les risques de perte d'allèles (NAMKOONG *et al.* 1988), nous avons choisi de maintenir une très grande diversité génétique en retenant un nombre beaucoup plus élevé d'individus. Ainsi, nos populations d'amélioration d'épinettes blanches sont constituées de 240 individus, alors que les vergers à graines de deuxième génération contiennent 125 individus. Un tel choix est susceptible de limiter le rendement des plantations, mais rend celles-ci potentiellement plus aptes à s'adapter aux changements climatiques et à ses conséquences, qu'elles soient de nature environnementale, entomologique ou pathologique (PERRY et MAGHEMBE 1989). Les impacts potentiels pour l'environnement associés à la plantation de matériel amélioré en forêt naturelle sont aussi minimisés. La sélection d'individus comportant de nouveaux caractères ou le partage de nos ressources génétiques avec d'autres pays seront ainsi favorisés.

Conclusion

Le Québec est maintenant en mesure d'augmenter sa production forestière par le reboisement avec du matériel amélioré, grâce au développement de variétés plus performantes et à l'acquisition de connaissances scientifiques et d'expertises dans de multiples disciplines applicables à l'échelle opérationnelle. La diversité du matériel amélioré maintenant disponible nous permet aussi bien de rentabiliser les terrains fertiles, principalement au sud de la province, que de mettre à profit les immenses superficies disponibles en forêt boréale. En forêt feuillue et dans la partie méridionale de la forêt mélangée, la plantation de matériel amélioré peut constituer un outil de développement économique et social, dans la mesure où elle pourrait permettre d'élaborer des systèmes de production de matière ligneuse sur mesure (produits spécialisés). En milieu agricole, elle pourrait être intégrée aux pratiques traditionnelles d'agriculture (agroforesterie) ou créer un environnement favorable au développement de produits autres que le bois (produits chimiques, pharmacologie et produits naturels, par exemple l'if (*Taxus spp.*) et l'argousier (*Hippophae spp.*). Dans un système intensif de production, la plantation de matériel amélioré pourrait contribuer à résoudre des problèmes environnementaux tels que les surplus de lisiers de porc utilisés comme fertilisants, ou l'augmentation des gaz à effet de serre. Ainsi, les peupliers hybrides sont déjà largement utilisés en Amérique du Nord dans des projets de phytorestauration pour décontaminer l'environnement agricole ou industriel (ISEBRANDS et KARNOSKY 2001). La plantation et la culture intensive de matériel amélioré pourrait aussi entraîner une réduction de la récolte de bois dans les forêts méridionales et ainsi favoriser d'autres utilisations de la forêt (chasse, pêche, villégiature, etc.).

En forêt boréale, malgré des conditions de croissance moins favorables, le volume supplémentaire de bois obtenu par la plantation de matériel amélioré n'est pas négligeable, compte tenu de l'importance du territoire et de la quantité de plants mis en terre. L'aménagement de plantations à haut rendement, combinant une sylviculture intensive et l'emploi de matériel génétiquement amélioré, demeure une voie privilégiée pour augmenter la productivité forestière. Comme l'illustre la **Figure 1**, la production d'un million de mètres cubes de bois requiert de 4 à 6 fois plus de superficie de forêt naturelle, selon l'espèce, que de superficie plantée avec des variétés améliorées en milieu productif. Le rendement obtenu permettrait de diminuer significativement la pression exercée sur les forêts naturelles et d'augmenter la superficie des aires protégées.

15 %
Production de bois 70 %
Production de bois 50 %

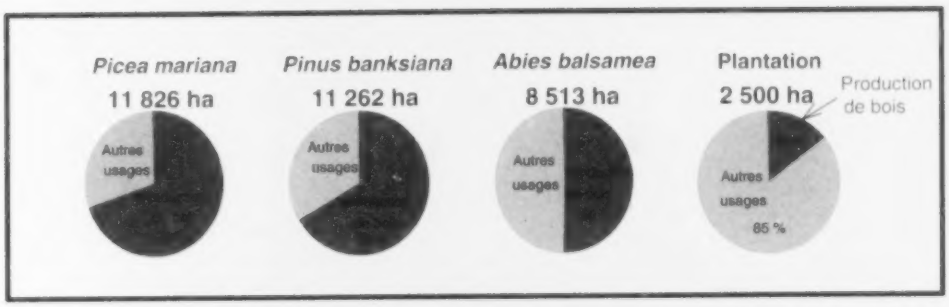

Figure 1. Superficies requises pour la production de 1 000 000 m^3 de bois en 50 ans par des peuplements naturels de productivité moyenne et des plantations d'un rendement moyen de 8 m^3 ha^{-1} an^{-1}. Ces superficies sont exprimées arbitrairement en fonction d'un territoire fictif de 17 000 ha. On constate qu'une grande partie du territoire peut être allouée à d'autres usages avec la plantation, comparativement aux forêts naturelles, selon l'espèce considérée.

Ouvrages cités

ANONYME, 1994. *Une stratégie : aménager pour mieux protéger les forêts*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction des programmes forestiers. 197 p.

ANONYME, 2000. *Investir dans les forêts québécoises pour en augmenter la productivité*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction des programmes forestiers. 10 p.

ANONYME, 2001. *Plantations comparatives pour l'amélioration génétique des arbres (1969 à 2001)*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Ouvrage non publié, 594 p.

ANONYME, 2002a. *Rapport sur l'état des forêts québécoises : 1995-1999*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la planification et des communications. 272 p.

ANONYME, 2002b. *Ressources et industries forestières; portrait statistique édition 2002 (résumé)*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction du développement des produits forestiers. 64 p.

BEAUDOIN, R., 1995. *Variation et choix des provenances de* Pinus contorta *Dougl. Ex. Loud. var* latifolia *Engelm. en plantation sur plusieurs sites au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 119, 94 p.

BEAUDOIN, R., 1996. *Variation et choix des provenances de pin sylvestre en plantation sur plusieurs sites au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 124, 72 p.

BEAUDOIN, R., 1996a. *Performance de 40 provenances d'Épinette du Colorado et de 2 provenances d'Épinette d'Engelmann en plantation sur un site du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 76, 8 p.

BEAUDOIN, R., 1997. *Performance de quelques provenances de pin ponderosa en plantation sur trois sites au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 79, 12 p.

BOUSQUET, J., J. BEAULIEU et M. VILLENEUVE, 1994. *Diversité génétique et amélioration des arbres*. Encart de l'Aubelle : partie 2 de 2 : De la production des semences améliorées à la conservation des ressources génétiques. Journal de l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, 11 p.

BROWN, S., J. SATHAYE, M. CANNEL et P. KAUPPI, 1996. *Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions*. *In* R.T. Watson, M.C. Zinyowera et R.H. Moss, ed. Climate Change 1995, impacts, adaptations and mitigations of climate change : scientific-technical analyses. Report, IPCC, p. 773-797. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.

DESPONTS, M., A. PLOURDE, J. BEAULIEU et G. DAOUST, 1993. *Impact de la sélection sur la variabilité génétique de l'épinette blanche au Québec*. Can. J. For. Res. 23 : 1196-1202.

FAO, 2001. *Situation des forêts du monde, 2001*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie. 181 p. ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/003/y0900f/.

GROUPE DE TRAVAIL SUR L'AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE DU MFO-QUÉBEC, 1996. *État de l'amélioration génétique des espèces forestières au Québec et besoins en plants génétiquement améliorés pour le reboisement.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Rapport n° 408, 75 p.

ISEBRANDS, J.G. et D.F. KARNOSKY, 2001. *Environmental benefits of poplar culture. In* Poplar Culture in North America. Part A, Chapter 6. Edited by D.I. Dickmann, J.G. Isebrands, J.E. Eckenwalder, and J. Richardson. NRC Research Press, National Research Council of Canada, Ottawa, ON K1A 0R6, Canada, p. 207-218.

LAMONTAGNE, I., 1992. *Vergers à graines de première génération et tests de descendances implantés au Québec pour les espèces résineuses. Bilan des réalisations.* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 106, 40 p.

LARSEN, J.B., 1995. *Ecological stability of forests and sustainable silviculture.* For. Ecol. Manage. 73(1-3) : 85-96.

MASSE, L., 2002. *Rentabilité du reboisement de plants améliorés.* Tableau synthèse présenté lors d'une visite-terrain, 17 octobre 2002, 1 p.

NAMKOONG, G., H.C. KANG et J.S. BROUARD, 1988. *Tree Breeding : Principles and Strategies. Monographs on Theoritical and Applied Genetics.* Springer-Verlag. New York.

PÉRINET, P., A. STIPANICIC et G. VALLÉE, 1998. *Projet de développement de la culture intensive d'arbres à croissance rapide.* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Québec. Rapport interne n° 440, 38 p.

PÉRINET, P., H. GAGNON et S. MORIN, 2001. *Liste des clones recommandés de peuplier hybride selon les sous-régions écologiques au Québec (révision février 2001).* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Québec. 1 p.

PERRY, D.A. et J. MAGHEMBE, 1989. *Ecosystem concepts and current trends in forest management.* For. Ecol. Manage. 26 : 123-140.

RIEMENSCHNEIDER, D.E., B.J. STANTON, G. VALLÉE et P. PÉRINET, 2001. *Poplar breeding strategies. Part A, Chapter 2. In* Poplar Culture in North America. Edited by D.I. Dickmann, J.G. Isebrands, J.E. Eckenwalder, and J. Richardson. NRC Research Press, National Research Council of Canada, Ottawa, ON K1A 0R6, Canada, p. 43-76.

VALLÉE, G. et C. CHOUINARD, 1976. *Le réseau d'arboretum du ministère des Terres et Forêts du Québec. Direction générale des forêts.* Mémoire de recherche forestière n° 119, 94 p.

WHITEMAN, A. et C. BROWN, 1999. *The potential role of forest plantations in meeting future demands for industrial wood products.* International Forestry Review 1(3) : 143-152.

Ressources
naturelles,
Faune et Parcs
Québec

2003-3121

ISBN 2-550-41805-0
Dépôt légal 2003
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada
© 2003 Gouvernement du Québec

Tree Improvement in Québec:
A Tool for Industrial and Environmental Productivity

Research Note
Tabled at the XII World Forestry Congress – Québec, Canada 2003,
by the *Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec*

September 2003

Direction de la recherche forestière (Forest Research Branch)

Ressources naturelles, Faune et Parcs
Québec

Tree Improvement in Québec:
A Tool for Industrial and Environmental Productivity

by

André Rainville[1], Mireille Desponts[2], Roger Beaudoin[1], Pierre Périnet[1], Marie-Josée Mottet[1] and Martin Perron[3]

Research Note
Tabled at the XII World Forestry Congress – Québec, Canada 2003,
by the *Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec*

Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec (MRNFP)
Direction de la recherche forestière (Forest Research Branch)
2700, rue Einstein
Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8
CANADA

Telephone: (418) 643-7994
Fax: (418) 643-2165

andre.rainville@mrnfp.gouv.qc.ca
mireille.desponts@mrnfp.gouv.qc.ca
roger.beaudoin@mrnfp.gouv.qc.ca
pierre.perinet@mrnfp.gouv.qc.ca
marie-josee.mottet@mrnfp.gouv.qc.ca
martin.perron@mrnfp.gouv.qc.ca

www.forestrycongress.gouv.qc.ca
www.mrnfp.gouv.qc.ca

---

[1] Forest Engineer, M.Sc. (Forestry)
[2] Biologist, M.Sc. (Biology), Ph.D. (Plant Biology)
[3] Biologist, Ph.D. (Forestry)

Abstract

More than 30 years of tree improvement work in Québec has resulted in the establishment of a large collection of material, comprising several native and introduced species. Among them, six are currently used for reforestation—three native species: black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.), white spruce (*P. glauca* (Moench) Voss) and jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.), as well as a few introduced larch species (*Larix* spp.), poplars (*Populus* spp.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). This large number of species contributes to meeting the diversified needs, current or anticipated, of the forest industry, and to improve the productivity of our plantations. Several hardwood species are also planted in the southern part of the province, especially on former agricultural lands.

The synergy between provincial and federal government research organizations, and the complementarity of their work, has made possible the evaluation of this material in every ecological region of Québec, in spite of the size of the territory and the diversity of forest ecosystems. In the first generation, planting improved material can bring about gains in merchantable volume of 8%–16% as compared to seeds from natural stands. Moreover, the concern to maintain broad genetic diversity among the seedlings used for reforestation is a guarantee of adaptation for Québec's diversified ecosystems and for the potential effects of climate change.

Also, planting improved material is a preferred solution to reduce the increasing pressure on natural forests, as much for the development of non-timber resources as for the creation of protected areas. In southern Québec (hardwood and mixedwood forests), where growth conditions further favour the intensive growing of high-yield species, it could play a determining role in the face of environmental (e.g., CO_2, pig manure), economic or social (local development tools) issues. In the boreal forest, even though bioclimatic conditions limit growth, planting improved material could significantly increase the overall yield of the forests, given the size of the territory and the number of seedlings planted.

Keywords: Tree improvement, forest genetics, reforestation, environment, biodiversity

Introduction

Québec's area is estimated to be 1,667,929 km^2, and stretches over more than 18°of latitude. In this immense area, climatic factors, generally more rigorous from south to north, usually determine the vegetation composition. Three distinct bioclimatic zones are found: the temperate nordic zone, composed of hardwood and mixedwood stands, the boreal zone, characterized by stands of evergreen softwoods, and the Arctic zone, dominated by shrub and herbaceous vegetation (Anonyme 2002a). Forest land covers nearly half the area of the Québec, and 85% of it is owned by the province (Anonyme 2002b). With annual deliveries of $20 billion and exports of $12 billion, the forest is one of the principal industrial sectors in Québec. It provides direct employment to more than 90,000 workers (Anonyme 2002a). The annual allowable cut in Québec's public forests is estimated at nearly 42 million m^3, and consists of 70% balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.), spruces (*Picea* spp.), jack pine and eastern larch (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch).

Currently, plantations account for 5% of the world's forest area. They ensure, however, an increasing part of the supply, and produce 35% of wood used in the world (Whiteman and Brown 1999; FAO 2001). As much in New Zealand (*Pinus radiata* D. Don) and Chili (*Pinus* spp. and *Eucalyptus* spp.), as in Scandinavia (*Picea abies* and *Pinus sylvestris* L., especially) and in the southern United States, vast programs aim at obtaining improved second-generation seedlings, and even third generations have been established. After only one generation, volume gains resulting from the use of seedlings from tree improvement programs vary between 5% and 15%, according to the country and the species, whereas equivalent additional gains are reported by adding intensive silviculture (*Groupe de travail sur l'amélioration génétique du MFO-Q* 1996).

In Québec, approximately 150 million seedlings are planted annually, or an area of 75,000 hectares (ha) (0.14% of the productive forest area), mainly in the boreal forest. About 52% of the seedlings currently used for reforestation come from tree improvement programs, and this proportion should increase to 80% in 2005 (Masse 2002). The government has the responsibility of supplying the required seeds and seedlings to reforest Québec's public and private lands. The *Stratégie de protection des forêts* (Forest Protection Strategy), adopted by the Québec government in 1994, aimed at ensuring forest renewal, protecting forest resources, harmonizing the multiple uses of the environment and eliminating the use of pesticides (in effect since 2001) (Anonyme 1994). The primary aim of the Strategy was to ensure the sustainability of ecosystems and to maintain biological diversity. To reach the goal, the government identified five broad directing principles, one of which was supporting natural stand dynamics. Priority was therefore accorded to natural regeneration. Considered as a complementary silvicultural treatment, reforestation nevertheless represents a preferred means to increase the productivity of Québec's forests.

Requirements related to applying the principle of sustainable development brought about increased pressures on forests, whether for developing non-timber resources or to create protected areas (Anonyme 2000). Furthermore, the ratification of the Kyoto

Protocol could result in major impacts on the management of natural forests and on reforestation or forestation programs. Therefore, tree planting is identified as the preferred strategy to fix atmospheric carbon. Specialists evaluate that plantations could contribute to fixing between 0.8 and 2.4 t/ha/year of supplementary carbon (Brown et al. 1996).

Tree improvement programs were established in Québec starting in 1969. The acquired knowledge and available material today put Québec in a privileged position to meet the challenge of increasing forest production and conserving biodiversity. This is a sizable challenge in a context where the boreal forest covers more than 40% of the forest area of the province.

Materials and methods

The first tree improvement work on the principal forest species was undertaken at the end of the 1950s. A more sustained effort was begun starting in 1969, when the government decided to invest in establishing a structured program. At the beginning of the 1980s, a vast network of first generation seed orchards was established to produce improved seeds (Lamontagne 1992). Work was carried out by researchers with the *ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec*[4] and of the Canadian Forest Service. Contrary to other Canadian provinces and some American states, there are no cooperatives that group together industrial partners and organizations who are interested in tree improvement.

Thirty years later, Québec has a large collection of material at its disposal (provenances, progeny, and improved varieties), including 18 native and 136 introduced species (64 hardwoods and 90 softwoods) (Anonyme 2001). In total, 3.8 million seedlings have been evaluated in 1,294 experiments distributed throughout the ecological regions. Efforts were especially made for black spruce and jack pine, two major components of Québec's boreal forest, and on white spruce. For the former two species, 81 progeny tests consisting of a million seedlings, were established to obtain an estimate of the genetic value of first-generation tree selections. The best material is conserved in 36 seed orchards, established throughout Québec's forested area. For white spruce, provenances from its entire distribution area and progeny from all over Québec have been evaluated in about 20 tests since the end of the 1950s. Seventeen first-generation clonal seed orchards were established early in the 1980s, and two second-generation orchards in 1999. The expected merchantable volume gains are 8%–16% and 15%–20%, respectively. Finally, the more recent increased interest for fast-growing forest species (poplars and larches) accelerated the establishment of sources of improved material (Périnet et al. 1998). The evaluation of more than 4,000 hybrid poplar clones, in clonal tests obtained mainly by controlled crosses, resulted in selecting about 50 of them for their frost hardiness and yield for intensive tree farming in several regions of Québec (Périnet et al. 2001; Riemenschneider et al. 2001).

[4] On April 29, 2003, the *ministère des Ressources naturelles du Québec* (MRN) became the *ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec* (MRNFP).

Concerning high-density hardwood species, the improvement program started a little more than 10 years ago, but collections of material representing several provenances had already identified significant variations in tree quality.

As a general rule, introduced species include a large number of provenances from their natural distribution areas, which allow us to simultaneously study their genetic variability and their capacity to adapt to growing conditions in Québec (Beaudoin 1995, 1996, 1996a, 1997). Geographic transfers created selection pressure on these provenances and revealed the best adapted material. A certain number of species, including Norway spruce, European larch (*Larix decidua* Mill.), Japanese larch (*L. kaempferi* (Lamb.) Carrière), hybrid larch (*Larix* X *marschlinsii* Coaz.), black poplar (*Populus nigra* L.), black cottonwood (*P. trichocarpa* Torr. and Gray) and balsam poplar (*P. maximowiczii* A. Henry), as well as poplars hybridized with native species, now contribute to increasing the diversity of reforestation species used in Québec, and to improve plantation productivity. These species are conserved principally in 19 arboretums and two populetums (Vallée and Chouinard 1976). They make up, for future use, unique collections of forest trees from the entire world, in particular from Europe, Japan and the United States. The trees best adapted to growing site conditions are an important source of genes for the tree improvement program, through the creation of local, more productive varieties having other characteristics looked for by industry. Experience acquired over more than 20 years with introduced species teaches us that it is important to evaluate them over a fairly long period in order to adequately evaluate their susceptibility to insects and diseases, as well as their growth requirements.

Still today, a large number of species (jack pine, white spruce, black spruce and Norway spruce, as well as two principal genera, *Larix* spp. and *Populus* spp.) are the objects of a sustained tree improvement program. We must highlight the great quantity and diversity of material that served as the genetic base for each species that was the subject of a tree improvement program. In fact, from the very beginning, forest geneticists undertook a representative sampling of the genetic diversity of a species, and established seed and clone banks. These banks represent insurance in case the original stands disappear, and could eventually be used to reintroduce diverse genetic elements for certain needs (different characteristics desired through improvement) and observed changes (e.g., varied ecological conditions) (Bousquet et al 1994). Molecular studies also estimated the impact of domestication on the variability and genetic structure of populations. With white spruce, for example, the analysis of seven enzymatic systems indicatesthat selecting a restricted number of individuals does not result in a significant loss of variability in relation to natural populations (Desponts et al. 1993).

Results

The sustained effort undertaken in tree improvement programs obtained interesting yields. For example, a new series of poplar hybrids, hardier and with a high yield (8 to 12 m^3/ha/year at age 20), was developed for the mixedwood and boreal forests (balsam

fir bioclimatic domains) (Anonyme 2002a). In southern Québec, where the climate is more favourable (1,330 to 2,000 growing degree-days), yields can reach 20 m^3/ha/year on the best sites at age 15 years. At the same time, work done with hybrid larch resulted in a mean yield of 6 to 10 m^3/ha/year at age 35.

White spruce grown from first-generation seed orchards and planted on sites with an average fertility index gives merchantable volume gains of 8%–16% (14 to 28 m^3/ha/year) at age 45, compared to seeds from natural stands. However, for species best adapted to the northern boreal forest (jack pine and black spruce), more modest yields are expected. For jack pine, the average gains in merchantable volume foreseen are 7 m^3/ha/year at age 40. By undertaking controlled crosses between individuals from superior families and propagating the progeny by rooted cuttings afterwards (bulk propagation of the best families), gains in the order of 20% in height (30%–40% in merchantable volume) could be attained for white spruce and black spruce, compared to the mean of all the families evaluated in tests, which could represent a volume gain of 72 m^3/ha/year at age 45.

The synergy between the provincial and federal research organizations and L'Université Laval, as well as the complementarity of their activities, is undoubtedly an important aspect of Québec's tree improvement program for forest species. It will have permitted, in spite of the size of the territory and the diversity of the forest ecosystems, an impressive quantity of material and several species to have been evaluated in every ecological region. This cooperation also has contributed to the development of complementary aspects of practical research through more basic and exploratory studies. Thus, acquiring knowledge of the tree genome could help those working in tree improvement to carry out selections (marker-assisted selection). Yet today, in spite of the withdrawal of the federal government in 1996 from applied research programs, the provincial government, now responsible for most tree improvement programs in Québec, carries on with collaborative work between the forest genetic research organizations. Over the years, a constant concern was given to develop close links between research and activities surrounding seed and seedling production. This collaboration has made it possible to quickly make research results available, in a concrete way, by producing a very large number of improved seedlings for reforestation. It will also have helped orient research more easily in terms of expressed needs, for example, by developing models to guide the transfer of seed sources as a function of a risk calculation, or clonal techniques such as rooted cuttings and somatic embryogenesis.

Furthermore, the large number of species which are still the object of tree improvement represent an advantage, because they allow us to choose the best-adapted material to each site and to favour a better diversification of products for industry. From an ecological point of view, resistance and stability of ecosystems against biotic and abiotic disturbance agents is associated with species richness (Larsen 1995). The same goes for the large number of families and clones included in our tests and production orchards. Though it is generally acknowledged that a number as limited as 50 trees allows for the long-term control of the effects of inbreeding and the risks of loss of

alleles (Namkoong et al 1988), we have chosen to maintain a very large genetic diversity by retaining a much larger number of individuals. Thus, our white spruce improvement populations are represented by 240 individuals, while second-generation seed orchards contain 125 individuals. This choice may limit plantation yields, yet render them more apt to adapt to climatic changes and its consequences, whether they are of an environmental, entomological or pathological nature (Perry and Maghembe 1989). The potential impacts on the environment associated with planting improved material in the natural forest are thus also minimized. The selection of individuals having new characteristics or sharing our genetic resources with other countries will also be promoted.

Conclusion

Québec is now able to increase its forest production by reforesting with improved material, thanks to the development of better-performing varieties, and acquiring scientific knowledge and expertise in many disciplines applicable at an operational scale. The diversity of improved material now available also allows us to maximize returns on fertile sites, mainly in the southern part of the province, or to profit from the immense areas available in the boreal forest. In the hardwood forest and in the southern part of the mixedwood forest, planting improved material could be an economic and social development tool, in that it could lead to the elaboration of systems to produce timber on demand (specialized products). In the agricultural land, it could be integrated with traditional agriculture (agroforestry) or create a favourable environment to develop products other than wood (chemicals, pharmacological and natural products—for example, yew (*Taxus* spp.) and sea buckthorn (*Hippophae* spp.). In an intensive production system, planting improved material could help resolve environmental problems, such as hog manure excess used as fertilizer, or increasing levels of greenhouse gases. For this, hybrid poplars are already widely used in North America in phytoremediation projects to decontaminate agricultural or industrial environments (Isebrands and Karnosky 2001). The planting and intensive tending of improved material could also bring about a reduction in the harvest of timber in southern forests, and thereby favour other uses for the forest (hunting, fishing, , recreation, etc.).

In the boreal forest, in spite of more unfavourable growing conditions, the extra volume obtained by reforestation using improved material is not negligible given the size of the territory. Managing high-yield plantations, combined with intensive silviculture and the use of genetically improved material, remains a sure way to increase forest production. As illustrated in **Figure 1**, the production of one million cubic metres of wood requires four to six times more area of natural forest, according to the species, as the area needed to plant with improved varieties on productive sites. The yield obtained would significantly reduce the pressures on natural forests and thereby increase protected areas.

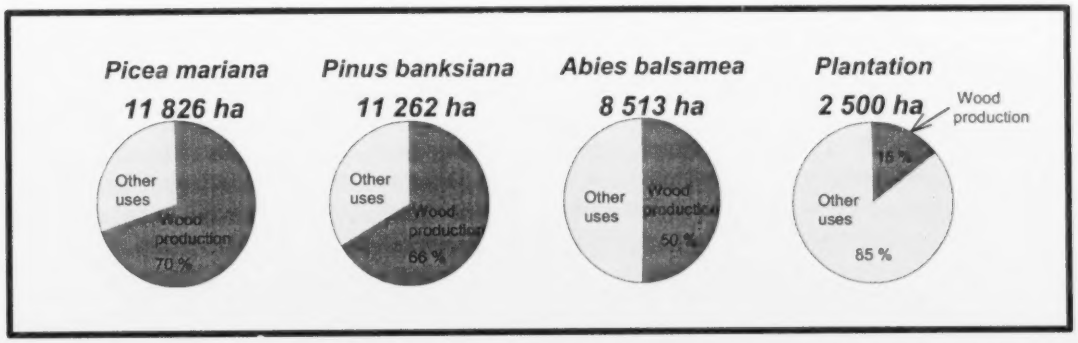

Figure 1. Areas required to produce 1,000,000 m^3 in 50 years from natural stands of average productivity and from plantations having a mean yield of 8 m^3/ha/year. These areas are expressed arbitrarily in terms of a fictitious territory of 17,000 ha. With plantations, a large part of the territory could be allocated to other uses, compared to natural forests, according to the species being considered.

References

Anonyme. 1994. Une stratégie : aménager pour mieux protéger les forêts. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction des programmes forestiers. 197 p.

Anonyme. 2000. Investir dans les forêts québécoises pour en augmenter la productivité. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction des programmes forestiers. 10 p.

Anonyme. 2001. Plantations comparatives pour l'amélioration génétique des arbres (1969 à 2001). Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Ouvrage non publié. 594 p.

Anonyme. 2002a. Rapport sur l'état des forêts québécoises : 1995–1999. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la planification et des communication. 272 p.

Anonyme. 2002b . Ressources et industries forestières; portrait statistique édition 2002 (résumé). Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction du développement des produits forestiers. 64 p.

Beaudoin, R. 1995. Variation et choix des provenances de *Pinus contorta* Dougl. Ex. Loud. var *latifolia* Engelm. en plantation sur plusieurs sites au Québec. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 119. 94 p.

Beaudoin, R. 1996. Variation et choix des provenances de pin sylvestre en plantation sur plusieurs sites au Québec. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 124. 72 p.

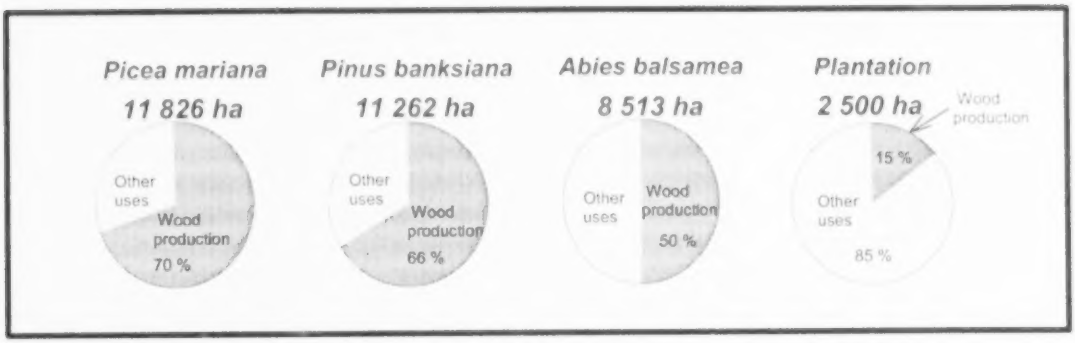

Figure 1. Areas required to produce 1,000,000 m^3 in 50 years from natural stands of average productivity and from plantations having a mean yield of 8 m^3/ha/year. These areas are expressed arbitrarily in terms of a fictitious territory of 17,000 ha. With plantations, a large part of the territory could be allocated to other uses, compared to natural forests, according to the species being considered.

References

Anonyme. 1994. Une stratégie : aménager pour mieux protéger les forêts. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction des programmes forestiers. 197 p.

Anonyme. 2000. Investir dans les forêts québécoises pour en augmenter la productivité. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction des programmes forestiers. 10 p.

Anonyme. 2001. Plantations comparatives pour l'amélioration génétique des arbres (1969 à 2001). Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Ouvrage non publié. 594 p.

Anonyme. 2002a. Rapport sur l'état des forêts québécoises : 1995–1999. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la planification et des communication. 272 p.

Anonyme. 2002b . Ressources et industries forestières; portrait statistique édition 2002 (résumé). Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction du développement des produits forestiers. 64 p.

Beaudoin, R. 1995. Variation et choix des provenances de *Pinus contorta* Dougl. Ex. Loud. var *latifolia* Engelm. en plantation sur plusieurs sites au Québec. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 119. 94 p.

Beaudoin, R. 1996. Variation et choix des provenances de pin sylvestre en plantation sur plusieurs sites au Québec. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 124. 72 p.

Beaudoin, R. 1996a. Performance de 40 provenances d'Épinette du Colorado et de 2 provenances d'Épinette d'Engelmann en plantation sur un site du Québec. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 76. 8 p.

Beaudoin, R. 1997. Performance de quelques provenances de pin ponderosa en plantation sur trois sites au Québec. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 79. 12 p.

Bousquet, J., J. Beaulieu and M. Villeneuve. 1994. Diversité génétique et amélioration des arbres. Encart de l'Aubelle : partie 2 de 2 : De la production des semences améliorées à la conservation des ressources génétiques. Journal de l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. 11 p.

Brown, S., J. Sathaye, M. Cannel and P. Kauppi. 1996. Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. *In*: R.T. Watson, M.C. Zinyowera and R.H. Moss, eds. Climate Change 1995, impacts, adaptations and mitigations of climate change: scientific-technical analyses. Report, IPCC, p. 773–797. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Desponts, M., A. Plourde, J. Beaulieu and G. Daoust. 1993. Impact de la sélection sur la variabilité génétique de l'épinette blanche au Québec. Can. J. For. Res. 23:1196–1202.

FAO. 2001. Situation des forêts du monde, 2001. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie. 181 p. ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/003/y0900f/.

Groupe de travail sur l'amélioration génétique du MFO-Québec. 1996. État de l'amélioration génétique des espèces forestières au Québec et besoins en plants génétiquement améliorés pour le reboisement. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Rapport n° 408. 75 p.

Isebrands, J.G. and D.F. Karnosky. 2001. Environmental benefits of poplar culture. *In*: Poplar Culture in North America. Part A, Chapter 6. D.I. Dickmann, J.G. Isebrands, J.E. Eckenwalder and J. Richardson, eds. NRC Research Press, National Research Council of Canada, Ottawa, ON, p. 207–218.

Lamontagne, I. 1992. Vergers à graines de première génération et tests de descendances implantés au Québec pour les espèces résineuses. Bilan des réalisations. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 106. 40 p.

Larsen, J.B. 1995. Ecological stability of forests and sustainable silviculture. For. Ecol. Manage. 73 (1–3):85–96.

Masse, L. 2002. Rentabilité du reboisement de plants améliorés. Tableau synthèse présenté lors d'une visite-terrain. 17 octobre 2002, 1 p.

Namkoong, G., H.C. Kang and J.S. Brouard.1988. Tree Breeding: Principles and Strategies. Monographs on Theoretical and Applied Genetics. Springer-Verlag. New York.

Périnet. P., A. Stipanicic and G. Vallée. 1998. Projet de développement de la culture intensive d'arbres à croissance rapide. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Québec. Rapport interne n° 440. 38 p.

Périnet. P., H. Gagnon and S. Morin. 2001. Liste des clones recommandés de peuplier hybride selon les sous-régions écologiques au Québec (révision février 2001). Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Québec. 1 p.

Perry, D.A. and J. Maghembe 1989. Ecosystem concepts and current trends in forest management. For. Ecol. Manage. 26:123–140.

Riemenschneider, D.E., Stanton, B.J., Vallée, G., and P. Périnet. 2001. Poplar breeding strategies. Part A, Chapter 2. *In*: Poplar Culture in North America. D.I. Dickmann, J.G. Isebrands, J.E. Eckenwalder and J. Richardson. eds. NRC Research Press, National Research Council of Canada, Ottawa, ON K1A 0R6 p. 43–76.

Vallée, G. and C. Chouinard. 1976. Le réseau d'arboretum du ministère des Terres et Forêts du Québec. Direction générale des forêts. Mémoire de recherche forestière n° 119. 94 p.

Whiteman, A. and C. Brown. 1999. The potential role of forest plantations in meeting future demands for industrial wood products. International Forestry Review 1(3):143–152.